

Development and Engineering Application of Automatic FRP Shell Production Line

Songlin Zhou

Lianyungang Zhongfu Lianzhong Composite Materials Group Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

Abstract

The manufacturing process of fiberglass membrane shells typically involves multiple steps, including material mixing, winding and layering, heating curing, demolding, surface turning and grinding, putty application and belt polishing, drilling, hydrostatic pressure testing, painting and baking, and packaging for storage. However, the numerous steps and low automation level of equipment have posed operational challenges for Company A. This paper analyzes the issues and causes in the development of automated fiberglass membrane shell production lines, proposes optimization suggestions, and evaluates the engineering application effects, aiming to provide reliable references for improving production efficiency and quality.

Keywords

Automated FRP membrane shell; Production line R&D; Engineering application

自动化玻璃钢膜壳生产线研发及工程化应用

周松林

连云港中复连众复合材料集团有限公司, 中国·江苏 连云港 222000

摘要

玻璃钢膜壳制造过程通常包含配料搅拌、缠绕铺层、加温固化、脱模、外表车削与打磨、打腻子与砂带抛光、打孔、静水压检测、喷漆烤漆、包装入库等环节。但由于工序较多,设备自动化程度不高,对A公司经营上造成了较大困难。为此,下文将对自动化玻璃钢膜壳生产线研发中存在的问题及其原因进行分析,并提出其优化建议,分析工程化应用效果,旨在为提高自动化玻璃钢膜壳生产效率与质量提供可靠参考。

关键词

自动化玻璃钢膜壳; 生产线研发; 工程应用

1 引言

玻璃钢膜壳兼具耐腐蚀与比强度优势,制造过程通常包含配料搅拌、缠绕铺层、加温固化、脱模、外表车削与打磨、打腻子与砂带抛光、打孔、静水压检测、喷漆烤漆、包装入库等环节。面对人工工序占比高、节拍波动大的不利情况,A公司认为有必要从工艺与装备两端同步推进自动化,形成可复制的工程化应用路径。

2 自动化玻璃钢膜壳生产线研发存在的问题

2.1 前端成形质量不稳定

在自动化玻璃钢膜壳生产线中,前端成形质量波动首先集中体现在包头加厚过渡区的外观上,纤维能否实现无滑移铺放直接关系包头质量。缠绕阶段若出现滑纱、毛纱结团、贫胶等现象,会造成包头圆顺度下降,包头坡面形成台阶,

内壁亦可能出现白斑、起泡或轻微分层等表观缺陷。此类缺陷在后续检验中常以筒身平整度不足、表面粗糙度偏高、端头壁厚不均与局部划伤风险增大等形式暴露。由于膜壳表面需满足车削、补腻子、砂带精磨及喷涂的工艺窗口,毛坯质量一旦偏离,就会引发修整工时叠加、返工率上升和批次节拍拉长,现场表现为等待与在制品积压增加,直接挤占打孔与试压等关键工序的有效产出。

2.2 打孔工序自动化程度低

在膜壳生产线中,打孔工序仍以人工测量与划线为主,孔位基准依靠吊装就位、吊线校正、手动对刀和压板锁紧来建立,掉头加工时需重复校验,节拍随操作者波动。孔加工往往要按预钻孔、提孔、内外台阶压孔等顺序完成,底孔、中孔与台阶分别用不同刀具实现,频繁停机换刀与试切复核使有效切削时间被压缩,单班产出通常只有10~12只。定位误差在不同装夹方案下会叠加放大,导致孔距、对称度与同轴性离散,后续装配与试压更依赖返修与挑选。

2.3 现有的膜壳打磨设备效率较低

在膜壳自动化生产线上,现有打磨装备多以筒身直线

【作者简介】周松林(1992—),男,本科,工程师,从事玻璃纤维增强树脂基复合材料产品开发、工艺研究。

磨块抛光为主，对包头斜坡、端口台阶孔边等复杂曲面覆盖不足，形成“筒身可磨、包头需转序”的断点。固化后工件仍需吊装装夹、多次换带与复磨，包头往往转入车床修形，再经历刮腻子、晾干和二次砂带精磨，工序串联使单件周转时间显著增加，现场常出现等待机床与等待腻子固化并存的现象。打磨轨迹与压力控制更多依赖人工经验，难以稳定实现随形贴合与恒定接触，同批产品外表面粗糙度离散、打磨质量参差不齐。

2.4 喷涂周期长

膜壳喷涂段通常按底漆喷涂、流平干燥、细磨整平、再喷面漆并烘烤漆房固化的顺序组织，膜壳在喷房与打磨区之间频繁转运与等待。底漆多用于增加漆膜厚度并遮盖微孔，喷后需留出充分固化时间，再进行水磨或砂纸精磨，磨后还要反复擦拭除油除水并重新遮蔽不喷区域，才能进入面漆段。面漆喷涂要求喷房洁净、门体关闭、温度与风向风速稳定，喷枪口径与喷距需逐批调整，准备与清场占用作业窗口。烘烤阶段存在固定温度区间与保温时间，装卸、冷却与复检同样占位，批次衔接不顺时常跨越多个班次，单批完成喷涂往往延至次日。

3 自动化玻璃钢膜壳生产线研发存在问题的主要原因

3.1 铺层路径与包头几何不匹配

铺层路径与包头几何不匹配是引发前端成形质量不稳定的主要原因，这主要是因为铺层顺序与受力走向、缠绕纱搭接角度不协调，尤其在包头区域坡度偏大时，纱带在曲率突变处更容易发生局部张力失衡，进而出现滑纱、起皱、搭接不均、局部树脂富集/贫化等缺陷。上述缺陷一旦形成，会直接表现为膜壳表面质量波动、后续车削与修整量增大，最终把“成形端的不稳定”传递到打磨与喷涂环节，形成连锁放大效应。

3.2 测量定位依赖人工导致节拍受限

目前打孔环节的关键瓶颈不在“钻孔动作本身”，而在测量、找正、定位与复核几乎都靠人工完成。人工定位带来的典型后果是：一是节拍受操作者熟练度影响，效率波动大；二是定位基准一致性不足，容易出现孔位偏差、重复返工；三是测量与定位占据主工时，导致设备利用率低。综合来看，本质原因是缺少稳定的定位基准体系与自动测量/对位/夹持的一体化装置，使得打孔无法形成可复制的标准节拍。

3.3 缺陷源头导致打磨余量大且工装适配不足

当前打磨效率低，很大一部分是被前端成形缺陷与表面粗糙度“拖慢”的。也就是说，表面起伏大、局部滑纱/搭接痕明显，会迫使打磨需要更多遍数、更长接触时间才能达到喷涂要求的粗糙度窗口。同时，现有打磨设备往往还存在两类共性不足。一是贴合与随形能力不足，包头曲面区域

难以保持稳定压力与接触面积，导致效率下降且一致性差，包头打磨困难；二是除尘与磨料管理不充分，粉尘堆积会降低切削效率、加速磨料钝化，进一步拉长工时。

3.4 依赖底漆补偿表面质量引发工序叠加

当前需要通过喷底漆来提升漆面质量，说明膜壳前道表面状态（粗糙度、孔隙/纹理、搭接痕等）未能稳定进入可直接面漆的窗口，只能用底漆进行填充、找平、遮盖，这会导致喷涂周期被多重因素拉长。具体包括：一是工序叠加，底漆喷涂、流平、固化/干燥、打磨修补再进入面漆；二是返修概率上升，底漆阶段暴露的针孔、波纹、砂痕需要二次处理；三是节拍被干燥固化牵制，喷涂本体时间占比不高，但等待时间显著。

4 自动化玻璃钢膜壳生产线研发的优化建议

4.1 优化铺层顺序与包头坡面角度

第一，重排铺层顺序，先锁定过渡区再形成外观层。将包头加厚区的关键层前置，优先布置对抗滑移与保证圆顺度的“约束层/锁边层”，使纤维带在过渡区先形成稳定受力框架，再逐步叠加以加厚层，最后再铺设外观修饰层。让过渡区在早期就具备抗剪与抗位移能力。第二，减小包头坡度并拉长过渡段，使厚度变化更可控。将加厚过渡从“短而陡”调整为“长而缓”，通过减小坡度、延长过渡长度，让每一层在坡面上的搭接长度更充分，降低纤维带在局部曲率突变处的应力集中与滑移概率。第三，围绕过渡区设置可执行的铺放控制点，确保顺序与坡面方案落地。在包头过渡区建立关键控制点，例如每一段的搭接起止位置、加厚层的递增节距以及外观层的收尾位置，形成与程序一致的检查项（如过渡区层次完成后再进入下一段）。通过顺序节点清晰、位置一致性可核对的方式，减少批次间波动，避免因毛坯偏离导致的返修叠加和在制品积压。

4.2 提高打孔的自动化程度

第一，建立统一的定位基准，减少人工校正环节。以膜壳端面与筒身外圆作为统一基准，设计一套“快速夹紧自动找正”的定位组件，包含V形支承或滚轮托架、端面限位、轴向顶紧与旋转角度限位机构，使吊装就位后可一次完成中心与角度的基准建立。夹具上预留基准块与定位销，换批或掉头时直接复位，避免重复吊线校正与手动对刀，把孔位误差控制在夹具与程序可控范围内。第二，开发自动打孔设备方案，合并工序并减少换刀停机。按“预孔水咀孔台阶”工艺路径进行整机方案设计，优先采用带刀库或多主轴的结构，将底孔中孔台阶加工在同一装夹下连续完成，通过自动换刀或多刀位切换替代频繁停机换刀与试切复核。第三，把辅助动作纳入设备节拍，提升连续作业能力。将孔位复测、冷却水加注与排屑清理改为设备自带功能配置，例如设置简易测头用于孔位复核、冷却液自动启停与定量补给、螺旋排屑或气液排屑装置，减少人工衔接停歇点。配套编制

三类基层可执行的点检表,分别覆盖装夹状态确认、刀具寿命管理与孔位抽样检验,将定位建立、加工过程与质量复核固化为标准化作业流程,以减少节拍波动并降低返修与挑选的几率^[1]。

4.3 可随形自动打磨设备联动改造

首先,优化膜壳端部涨紧与支撑体系。将膜壳旋转由电机驱动统一控制,两端内夹持采用气动涨塞实现快速定位与可靠夹紧,兼顾夹持精度与夹紧力,并可通过更换涨塞规格适配不同型号膜壳。在筒体下方增设尼龙辊支撑,形成端部定位 轴向限位 下部托撑的稳定结构,降低打磨过程的振动与跳动,减少复磨与返工。第二,配置自动打磨小车。在床体上增设自动打磨小车,小车集成打磨装置与粉尘收集装置。小车结构采用固定架加双行走伺服电机方案,伺服输出端配置行走齿轮并与床体齿条啮合,实现稳定直线进给;小车顶部布置压紧气缸,带动磨块压紧架与调整机构,通过气压调节实现磨块下压力可控,并允许磨块随形上下,覆盖包头斜坡、端口过渡与孔边台阶等区域,减少工序断点。第三,完善电路与控制系统。建立计算机电路控制系统,将膜壳旋转、打磨小车行走速度与砂带打磨机启停纳入联动控制,按工位设定转速、进给与压紧气压的参数组合,使受力与速度同步匹配,避免人工凭经验调压调速造成的粗糙度离散。

4.4 漆层路径精简与表面质量前控

第一,取消底漆工序。在玻璃钢基材耐腐蚀性能满足使用条件的前提下,将“底漆喷涂 流平干燥 细磨整平”从流程中剔除,喷涂段采用单道面漆成膜,直接进入烘烤固化与复检。底漆原本用于增厚与遮盖微孔,若前道成形与打磨已能稳定控制表面缺陷,则单涂体系可显著减少等待、转运与二次遮蔽等非加工时间,同时降低因底漆打磨带来的返工风险。第二,把表面质量控制前移到成形与打磨段。以包头过渡区为重点,将铺层顺序与包头坡面匹配优化落到工艺参数上,降低坡面台阶与拉毛来源;同步通过提升打磨装备的随形能力与受力稳定性,将粗糙度和局部微孔控制在面漆可接受范围。车削量与补腻子量随之下降,喷涂前的精磨、擦拭与遮蔽次数减少,使喷房准备窗口更集中,批次衔接更顺畅^[2]。

5 自动化玻璃钢膜壳生产线工程化应用效果分析

5.1 包头成形平滑过渡实现免车削

针对高压力与多开孔膜壳包头大、斜坡易滑纱的问题,通过调整铺层顺序并采用先短后长的加厚策略,使各加厚层起点与终点错开,叠加网眼布辅助过渡,包头变加厚区的厚度梯度更连续,斜坡台阶与拉毛显著减少。工艺稳定后,包

头可直接进入打磨环节,不再依赖车床先修形再打磨。以单只膜壳计,包头切削量约减少 1kg,同时打磨可控性更好,包头表面一致性随之提升。

5.2 打孔定位与工序切换实现标准化增产

科学选择自动钻孔设备型号,使用双龙门三工序打孔机,能够在排钻以及膜壳刀具间完成顺利切换。利用排钻进行筛管打孔,并利用开孔器进行膜壳打孔,实现了全自动定位,钻孔、提孔、压孔的自动切换。这样一来能有效避免了人工划线、定位等低质低效的问题。完成初次定位后,可以实现标准化打孔,加工效率提高 120%,实现产量的大幅增长。

5.3 表面质量提升带动喷涂工序缩短

更新与改造膜壳打磨设备后,包头免车削实现了常态化运行,产品可以一次打磨完直线段的筒体和两端凸起的包头,在打磨效率提升 80% 的同时,有效抑制了表面的气孔数量,有效控制其粗糙程度,膜壳表面打磨质量得到大幅提升从而具备了直接喷面漆的条件,从而减少了喷底漆的工序,经过测试,在面漆厚度达到 50um 以上,即可达到要求的表面质量,实现免喷底漆的目的,可降低成本 10%。

5.4 产能与成本双向改善

经过以上工艺升级后,后续各工序能从每天单班产量提升 80%,人工成本降低 50%,且每只膜壳可节省底漆等材料费用约 10%。通过节拍分析定位瓶颈,再以提升前道质量、装备自动化、功能集成、工序压缩的路径实施,A 公司成功能够实现产能与成本的双向改善^[3]。

6 结语

本文以 A 公司自动化玻璃钢膜壳生产线的落地,以优化铺层顺序与包头坡面角度、提高打孔的自动化程度、可随形自动打磨设备联动改造以及漆层路径精简与表面质量前控为主线展开。实践表明,经过针对性地优化与改进,自动化玻璃钢膜壳生产线实现包头成形平滑过渡实现免车削,打孔定位与工序切换实现标准化增产,表面质量提升带动喷涂工序缩短以及产能与成本双向改善,说明该方案具备推广条件,可作为后续玻璃钢膜壳产线扩展与标准化建设的技术基础。

参考文献

- [1] 荆蓉,张锐涛,孟雨辰,等.玻璃纤维/聚丙烯复合纤维纱拉挤成型过程[J].复合材料科学与工程,2020(5):7.
- [2] 孔启航.浅析玻璃钢设备在离子膜烧碱装置中的应用[J].中华建设,2020.
- [3] 李厥瑾.基于PLC的玻璃钢拉挤生产线控制系统研究与开发[D].中国海洋大学[2025-12-31].